中国科学: 地球科学 2013 年 第 43 卷 第 11 期: 1760 ~ 1769
www.scichina.com earth.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

论 文

面向全球变化探测的月基成像雷达概念研究

郭华东[①*], 丁翼星[①②], 刘广[①], 张道卫[①], 傅文学[①], 张露[①]

① 中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100094;
② 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049
* E-mail: hdguo@ceode.ac.cn

收稿日期: 2013-02-09; 接受日期: 2013-08-16; 网络版发表日期: 2013-10-30
国家重点基础研究发展计划(编号: 2009CB723906)和国家自然科学基金项目(批准号: 60972141)资助

摘要 全球变化研究日益受到世界各国政府与科学界的高度关注. 合成孔径成像雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)作为一种主动微波遥感成像手段, 在对地观测中发挥着重要作用. 为实现对地球的大尺度、连续性、长期性动态观测, 更好满足全球变化科学问题研究的需要, 并形成与星机载对地观测技术互补的能力, 本文提出在月球上建立一个成像雷达系统, 基于月球平台展开面向全球变化的观测的设想. 月基成像雷达系统具有高分辨率、宽测绘带幅宽的特点, 条带模式下测绘带幅宽可达数千公里, 采用扫描模式一天可以覆盖地球表面的 40%, 其空间分辨率可达 10 m 级甚至更高. 通过简化的观测模型, 本文定量分析了月基成像雷达的空间分辨率和覆盖范围, 并通过模拟观测青藏高原和亚马逊平原的覆盖范围. 结果表明, 该系统大部分天数能完全覆盖青藏高原, 而观测亚马逊平原的覆盖率在 40%~70%之间. 通过月基成像雷达可以提供大范围、长期而且稳定的时间序列数据, 为全球变化研究提供有力的支持.

关键词
对地观测
全球变化
月基合成孔径雷达

地球作为一颗行星, 其长期自然演化过程中呈现的大尺度、动态变化现象与人类环境密切相关, 这种全球变化现象已成为各国政府和科技界日益关注的方向之一(Steffen 等, 2004). 而空间对地观测技术的发展为从整体上观测、分析和模拟地球系统的环境变化提供了新方法, 是观测全球变化现象的重要手段.

把月球作为一个对地观测平台, 在月球上布设传感器对地球进行全面、持续、长期观测是一种新概念空间观测手段, 在全球变化研究中具有其独特的优势. 从月球观测地球最早可以追溯到 1972 年, 阿波罗 16 号宇宙飞船第五次将人类送上月球, 宇航员们使用远紫外线望远镜和光谱仪获取了地球大气和地冕的图像和光谱(Carruthers 等, 1972), 但是由于当时技术能力的限制, 并没有获得连续的长时间的对地观测数据, 并且随后的 30 余年中, 相关的研究工作也基本停滞, 这种情况一直持续到 21 世纪初期. Johnson 等 [1)]经过综合分析, 提出了月基可见光/近红

1) Johnson J R, Lucey P G, Stone T C, et al. 2007. Visible/near-infrared remote sensing of Earth from the Moon. NASA Advisory Council Workshop on Science Associated with the Lunar Exploration Architecture White Papers

中文引用格式: 郭华东, 丁翼星, 刘广, 等. 面向全球变化探测的月基成像雷达概念研究. 中国科学: 地球科学, 2013, 43: 1760–1769
英文引用格式: Guo H D, Ding Y X, Liu G, et al. Conceptual Study of Lunar-based SAR for Global Change Monitoring. Science China: Earth Sciences, 2013, doi: 10.1007/s11430-013-4714-2

外仪器对地观测科学思路, 并对部分限制因素如空间分辨率、光谱分辨率及时间分辨率进行了初步探讨. Ramsey 等 [2)]则对利用热红外传感器从月球监视地球的热点目标及自然灾害的可行性进行了分析, 认为月基仪器能够成功的实现大范围的地表热点探测, 如火山爆发及大面积的火灾等. Palle 等(2009)从地球的辐射平衡和球面反照率反演问题出发对月基对地观测技术进行了探讨, 指出利用月球观测地球反射光的最大优势在于可以在多种观测方法中达到折中.

成像雷达是一种主动探测传感器, 具有全天时、全天候探测的优点(郭华东, 2000), 目前部分学者对在月球上布设合成孔径雷达的可行性进行了研究, 2007 年 Ramsey 提出过月基单发多收的合成孔径雷达干涉系统(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)和月球发射近地轨道卫星星座接收的多站 InSAR 系统 [3)]. 随后意大利科学家 Moccia 等和 Fornaro 等分别以干涉应用为主要目的计算了月基 SAR 的系统参数, 并讨论了长积分时间问题和月基 InSAR 机理. Moccia 等(2010)提出了一个高空间和时间分辨率地表测图的月基干涉合成孔径雷达系统, 比较了条带模式、聚束模式下的系统表现, 最后分析了影响月基单轨双天线干涉测图精度的因素. Fornaro 等(2010)对比分析了星载 SAR 与月基 SAR 系统的性能, 并详细讨论了月基重轨干涉和顺轨干涉应用中的一些科学问题和技术问题. 对比星载 SAR, 月基 SAR 最显著的特点是其超远的观测距离. 一方面, 月基 SAR 的远观测距离会带来一些系统上的限制, 如为了解决方位和距离模糊需要大面积的接收天线, 为了达到理想的信噪比需要提高发射功率等. 另一方面, 其一些独特的观测性能优势也恰好得益于距离的增加, 如在条带模式下即有足够长的积分时间以获取稳定散射体的高地理分辨率图像、较优的持续跟踪目标和搜索热点事件的能力.

从目前的研究成果来看, 在月球上布设成像雷达进行地球观测将有可能成为月基对地全球变化观测的一个非常重要的组成, 但目前的月基 SAR 研究尚缺乏针对全球变化方面的研究, 全球变化观测需要满足空间一致性和时间一致性统一的需求(Rosenqvist 等, 2000, 2007), 为了对地球进行有效观测, 尤其需要解决测绘带幅宽和重复观测频率不够等问题. 针对全球变化观测应用这一需求, 本文提出面向全球变化观测的月基 SAR(Global Change Observation Lunar based SAR, GCOLB-SAR)的概念, 并给出一组系统参数实例, 模拟分析其对地观测的整体性和连续性.

本文首先分析了低轨 SAR 系统测绘带宽较窄、重复观测频率不足所带来的一些应用问题, 引出了面向全球变化的月基成像雷达的概念. 然后从可见范围和可见天数的角度分析了 GCOLB-SAR 覆盖特性, 并严格推导了空间分辨率和测绘带宽这两个关键参数. 进一步笔者提出一个面向全球变化的 L 波段 GCOLB-SAR 系统实例, 分析了该系统在全球环境变化典型现象探测应用中的性能, 并以青藏高原和亚马逊平原为典型示例模拟分析了该系统时空覆盖性能, 进一步揭示了 GCOLB-SAR 对于全球变化监测的潜在能力.

1 现有 SAR 遥感平台探测全球变化所面临的问题

与光学传感器相比, SAR 遥感不受太阳光照的影响, 能全天时、全天候实现对地观测, 并且它的空间分辨率不受观测距离的限制(Henderson 等, 1998). 现有的 SAR 遥感平台主要可分为机载平台和星载平台, 表 1 给出了部分 SAR 系统的典型参数. 全球变化研究需要大尺度观测遥感监测能力, 低轨 SAR 卫星的可视区域由于受到轨道高度的限制, 仅仅通过雷达系统参数或观测模式的调整难以实现千公里以上的测绘带幅宽. 虽然利用影像拼接的方式可以扩大高分辨率图像的覆盖面积, 但是影像的获取时间不一致甚至存在较大差异, 使得拼接结果无法满足面向全球遥感观测空间一致性和时间一致性统一的需求, 即不能在相对一致的观测时间段内获得地球上大区域的无缝覆盖. 典型的例子如 Rignot 等(2011)

2) Ramsey M S. 2007. Thermal infrared data from the moon: Hazards and hot-spots. NASA Advisory Council Workshop on Science Associated with the Lunar Exploration Architecture White Papers

3) http://www.lpi.usra.edu/meetings/LEA/presentations/OpeningPlenary/Ramsey_ESS.pdf; http://www.lpi.usra.edu/meetings/LEA/presentations/closing_plenary/Ramsey_ESS_summary_20070302.pdf; http://science.nasa.gov/media/medialibrary/2010/03/31/ESS_Jul06_Lunar-Breakout_.pdf

表 1　典型星机载 SAR 系统参数

	轨道/飞行高度(km)	频率(GHz)	天线尺寸(m^2)	测绘带幅宽(km)	
				标准	最宽
Seasat	800	1.275	10.74×2.16	100	
Envisat	800	5.33	10×1.3	100	400
Radarsat	798	5.3	15×1.5	105	520
ALOS	691.65	1.27	8.9×3.1	40~70	350
ESAR	8	X (9.6), C (5.3), L (1.3), P (0.360)		3 (NS) / 5 (WS)	
GLOBESAR	7	X (9.25), C (5.3)		22	63

在研究南极冰川流速时, 用到了 900 多幅、5 个传感器、时间跨度为 13 年的数据, 才实现整个南极冰盖的无缝覆盖.

提升轨道高度是增大观测范围和测绘带幅宽最有效的方法. 倾斜地球同步轨道卫星 SAR(Inclined Geostationary Earth Orbit SAR, Inclined GEOSAR)是 20 世纪 80 年代提出的一个新系统概念(Kiyo 等, 1983). 它的轨道高度为 36000 km, 具有良好的可视范围和重访特性, 其距离测绘带幅宽也优于低轨系统. 但是由于庞大的天线和供能子系统难以搭载在人造卫星上(Bruno 等, 2006), 因此尚未能实现. 以月球作为平台的月基SAR轨道高度约为380000 km, 是GEOSAR 轨道高度的 10 倍左右. 它具有更大的可观测范围和测绘带幅宽、稳定的平台, 而且它的寿命相当长, 可以在轨进行维护和更新. 月球作为地球唯一的自然卫星, 是距地球最近的天体, 也是人类目前唯一能到达的地外星球. 同时, 月球的运动规律和表面环境已经为人们所熟知. 月基对地观测具有卫星和飞机平台所不具有的特点, 可以作为传统观测方法的有效补充, 实现优势互补.

基于以上的分析, 笔者提出面向全球变化的月基 SAR 概念, 即在月球上建立一个具有较高分辨率和大测绘带幅宽的 SAR 系统, 实现与全球变化相关的大尺度地学现象的整体持续观测.

2　月基 SAR 系统分析

月基 SAR 的观测几何和星载 SAR 系统十分相似, 不同之处在于月基 SAR 的孔径合成中的相对运动主要是地球自转, 而在星载 SAR 系统中, 平台自身的运动的合成效应比地球自转运动要大得多. 为方便分析月基 SAR 的系统性能, 本文采用简化月基 SAR 观测几何模型: (1) 假定地球为正规的球形, 这个假设所造成的成像误差在系统性能分析时可以忽略, 但在精确成像模型中需要补偿; (2) 地球自转角速度变化很小, 假定其为定值; (3) 不考虑月球天平动和章动; (4) 只考虑地球自转对月基 SAR 合成孔径的影响, 忽略月球绕地运动对合成孔径的影响. 在月基 SAR 系统中, 由于观测几何的特殊性, 月球公转对斜距变化率的影响并不大, 地球自转才是多普勒频移的主要来源, 两者所产生多普勒带宽之比约等于两者角速度之比, 后者为前者的 27.4 倍.

经过简化以后, 在目标的照射时间内, 月球上的天线在地心惯性坐标系中是静止的, 目标随着地球自转自西向东穿过雷达波束. 星载的 SAR 成像都是基于平台的运动, 而在月基 SAR 系统中恰恰相反, 平台基本静止而目标运动. 另外, 也可以将目标视为静止, 而将两者之间的相对运动转移到天线上, 这样等效为一种滑动聚束模式(Fornaro 等, 2010). 天线随月球运动而运动, 运动角速度近似为地球自转角速度. 天线波束在地面上投影的运动速度为观测目标所在纬度的地球自转速度. 在此基础之上作者定义了计算坐标系统(见网络版附录, http://earth.scichina.com), 并基于此坐标系统, 重点分析了与全球变化相关的重要参数.

2.1　可视范围和可观测天数

与星载 SAR 相比, 月基 SAR 具有无可比拟的超大可观测范围, 是其适合全球变化研究最重要的一个特点. 月基 SAR 系统只需要约 2°的观测立体角就可以覆盖半个地球. 如果不考虑入射角的影响, 月基 SAR 的瞬时可观测范围接近地球表面的 50%. 由于

入射角的大小对 SAR 系统成像的影响, 实际的可观测范围要小一些. 一方面, 在大入射角的情况下雷达的后向散射能量会迅速衰减, 图像信噪比大幅降低; 另一方面, SAR 侧视成像的机制使得星下点附近存在固有的盲区. 因此, 在做前述分析的时候应该去除这两个区域. 如将 SAR 可观测的入射角范围设定在 10°~66°, 月基 SAR 的瞬时观测范围仍然可以达到整个地球表面的 24%, 远远优于现有的星载 SAR 系统的 6%(以轨道高度 800 km 计算). 实际上, 低轨卫星的入射角一般选在 20°~30°之间. 在此范围内, 低轨卫星的测绘带幅宽约为 130 km, 而月基 SAR 的测绘带幅宽可达到 1100 km, 为前者的 8~9 倍.

在利用月基 SAR 对地球进行观测的时候, 随着月球赤纬的不断变化, 地面上可观测区域也在不断变化. 由于月基 SAR 大致沿纬度圈形成观测条带, 因此可以根据纬度将地球划分为多个观测区域, 不同观测区域具有不同的时间覆盖度(图 1):

(1) 纬度小于 14°区域: 月球星下点完全影响区, 每个月约有 11 d 处于观测盲区, 不同纬度目标处于盲区的时间不相同, 能形成等间隔为半个月的时间序列数据.

(2) 纬度为 14°~34°区域: 月球星下点部分影响区, 每个月有 1~11 d 无法被观测到. 离赤道越远, 可观测天数越多.

(3) 纬度为 34°~42°区域: 完全可见区, 可以形成等间隔为 1 d 的时间序列数据.

(4) 纬度大于 42°区域: 后向散射能量限制区, 越靠近极地, 可观测天数越少, 极点附近每个月可观测 1~2 d.

我国位于 3°~54°N, 因此所有地区每个月都能由

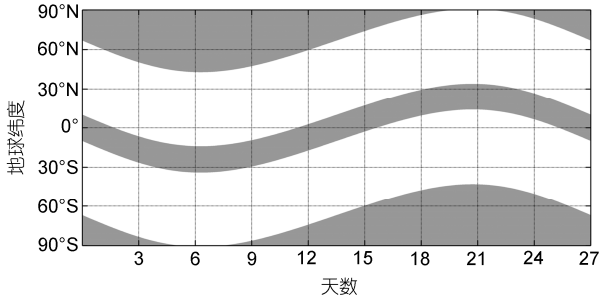


图 1　月基 SAR 入射角为 10°~66°时一个月内各个纬度地区可被观测到的时间

从月球位于南纬 24°时起算, 白色表示可以观测到的纬度范围

月基 SAR 观测 17 d 以上. 从世界范围内看, 主要的雨林区、沙漠区、整个青藏高原区和绝大部分的人类活动区都处在 17 d 以上可观测区内, 这种大区域的持续观测将非常有利于全球变化现象的整体研究. 对于极地区域的观测, 虽然月基 SAR 受到一定的限制, 但在极地边缘的冻融作用剧烈的地区, 月基 SAR 每个月也至少能观测一次.

2.2　空间分辨率和测绘带幅宽

2.2.1　距离分辨率分析

为了保证距离向的分辨率, SAR 必须在侧视的条件下工作. 与机载和低轨星载 SAR 不同, 由于地球曲率的影响, 月基 SAR 的观测俯角与入射角并不互补. 月基 SAR 的地距分辨率可表示为(Moccia 等, 2010)

$$\rho_{\mathrm{rg}}=\frac{c}{2B\sin\theta_i}, \tag{1}$$

其中 c 为光速, θ_i 为入射角, B 为发射系统带宽. 如果入射角太小, 会导致距离向分辨率降低; 而入射角过大, 会导致后向散射能量过小, 使图像信噪比降低. 为了月基 SAR 达到米级分辨率, 系统的发射带宽范围需 16~864 MHz. 如果只需要百米级的分辨率, 则所需最大发射带宽为 9 MHz.

2.2.2　方位分辨率分析

由于简化模型时的假设, 月基 SAR 的方位向就是照射区域随地球自转的方向, 它与地球纬度圈是一致的. 系统与地物之间的相对运动速度其实就是地物所在纬度圈的自转速度. 化简计算坐标系(见网络版附录, http://earth.scichina. com)中推导出的结论可以得到月基 SAR 的多普勒带宽:

$$B_{\mathrm{D}}=\frac{2D_{\mathrm{em}}\omega_{\mathrm{e}}\cos\delta_{\mathrm{m}}}{L_{\mathrm{a}}}, \tag{2}$$

其中, D_{em} 表示地月距离, ω_{e} 为地球自转角速度, δ_{m} 为月球所在赤纬, L_{a} 为天线方位向孔径长度. 上式表明月基 SAR 的多普勒带宽只是月球赤纬和天线方位向孔径长度的函数, 而与目标的纬度无关, 因此在同一个波束印记里所有目标具有相同的多普勒带宽. 同时利用波束在地面上的运动速度 $V=\omega_{\mathrm{e}}R_{\mathrm{e}}\cos\delta_{\mathrm{g}}$($R_{\mathrm{e}}$ 和 δ_{g} 分别为地球半径和目标纬度), 可以获得月基 SAR 方位向分辨率的表示:

$$\rho_{\mathrm{a}}=\frac{V}{B_{\mathrm{D}}}=\frac{L_{\mathrm{a}}}{2}\cdot\frac{R_{\mathrm{e}}}{D_{\mathrm{em}}}\cdot\frac{\cos\delta_{\mathrm{g}}}{\cos\delta_{\mathrm{m}}}. \tag{3}$$

与一般的机载星载 SAR 相比, 虽然月基 SAR 的方位分辨率也直接与半孔径长度相关, 却多出了 $R_{\mathrm{e}}/D_{\mathrm{em}}$ 和 $\cos\delta_{\mathrm{g}}/\cos\delta_{\mathrm{m}}$ 两个因子. 由于月球的轨道倾角在 18.3°~28.6°范围变化, 因此月球的赤纬不会大于 28.6°. 这样, 月球赤纬对方位分辨率的影响不会太大. 但是, 地球上目标所在的纬度对方位分辨率的影响较为明显, 纬度越高, 方位分辨率越好. 这是由于随着纬度的增大地球自转线速度减小, 从而增加了目标的照射时间. Fornaro 等(2010)给出了方位分辨率的估计值, 但是没有 $\cos\delta_{\mathrm{g}}/\cos\delta_{\mathrm{m}}$ 这个因子. 受到目标相干时间的限制, 分辨率并不会随着目标纬度的提高而无限变小. 雷达照射目标时间超出目标的相干时间的部分, 并不会带来额外的增益, 即目标的相干时间限制了该目标所能达到分辨率的上限.

月基 SAR 积分时间较长, 需要详细考虑回波中的失相干因素. 回波失相干的原因可以分为三类: 天线目标相对位置变化、大气时空变化和地物后向散射系数随时间变化. 天线目标相对位置变化主要指观测角度的变化(入射角和方位角)和观测距离的变化; 大气时空变化包括大气水分压和电离层电子总数的空间分布不均; 地物后向散射系数随时间变化主要指部分散射体在成像过程中自身的散射特性发生了改变, 如强风场下的植被、沙漠和水面等. 考虑分钟量级的积分时间, 入射角的变化没有引起显著的空间去相关, 方位角和距离变化引起的去相关需用补偿算法来改善. 大气的去相关效应比较复杂, 取决于空气中水汽的时空分布(Bruno 等, 2010). 对于部分散射体, 失去相干会降低方位向分辨率并减少单点目标的后向散射能量. 海洋区域的相干时间通常小于 1 s, 这意味着其方位分辨率要下降数百倍, 而植被覆盖区的去相关取决于植被类型、风速、天气情况和信号极化等因素(Fornaro 等, 2010; Moccia 等, 2010) .

2.2.3 地面测绘带幅宽分析

在曲线几何条件下, 月基 SAR 地面测绘带幅宽 W_{g} 与距离向波束展宽 $\theta_{\mathrm{r}}=\lambda/L_{\mathrm{r}}$($\lambda$为波长, L_{r} 为雷达天线高度)的关系为(图 2)

$$W_{\mathrm{g}}=R_{\mathrm{e}}\left[\arcsin\frac{D_{\mathrm{em}}(\theta_{\mathrm{r}}+\theta_{\mathrm{l}})}{R_{\mathrm{e}}}-\arcsin\frac{D_{\mathrm{em}}\theta_{\mathrm{l}}}{R_{\mathrm{e}}}-\theta_{\mathrm{r}}\right], \tag{4}$$

其中 θ_{l} 为近距一侧波束边缘对应的星下点离线角. 在确定 SAR 系统的距离测绘带幅宽后, 也可以通过上式反求距离向波束展宽, 从而确定雷达天线的高度. 斜距测绘带幅宽 W_{s} 等于远距与近距之差, 除以半光速即转化为两者回波信号的时间延迟, 为了抑制距离模糊, 时间延迟需小于脉冲重复频率(PRF)的倒数. 此外, 脉冲重复频率要大于多普勒带宽, 从而达到足够的方位向采样率, 抑制方位模糊, 因此有如下关系(Curland 等, 1991):

$$B_{\mathrm{D}}<PRF<\frac{c}{2W_{\mathrm{s}}}. \tag{5}$$

在已知 W_{s} 的情况下, 可根据上式计算方位向天线孔径长度和天线面积的最小值. 由于在曲线观测几何下, 增大距离测绘带幅宽会导致最小天线长度和最小天线面积迅速增大, 从而增加实现的难度, 因此选择参数时应考虑大测绘带幅宽与小天线面积之间的折中, 进行优化设计.

3 GCOLB-SAR 的典型参数设计

考虑到面向全球变化研究应用的需求, 在 GCOLB-SAR 参数设计时应该尽可能的增大其距离向的测绘带幅宽以达到观测的整体性要求. 不同于以往的月基 SAR 系统设计, 为达到高分辨率和宽测绘带的目的, GCOLB-SAR 的方位向天线长度应明显大于距离向天线高度. 但是过小的天线高度会导致方位向天线长度的迅速增加, 从而降低方位向分辨率并增加最小天线面积. 经过综合考虑, 在设计天线高度时距离测绘带幅宽应为 2000 km 左右, 这样方位分辨率能达到 1.6~6.9 m, 对应的天线高度为 57 m. 这样设计还有一个优点, 即在使用扫描模式进行观测时, GCOLB-SAR 可以用 3 个子条带涵盖任意一侧的所有可视区域.

表 2 给出了 GCOLB-SAR 的典型参数, 其中接收机温度设为 600 K, 噪声系数和损耗设为 3 dB. 噪声等效后向散射系数 σ_0/SNR 设为−35 dB. 不考虑纬度因素和多视处理, 方位向和距离向都能达到数米的分辨率. 由于过高的分辨率会大大增加数据量和处理时间, 因此实际操作时可以根据不同应用选择不同的空间分辨率. 对于全球变化应用, 可将距离和方位向的分辨率采样至 10~50 m, 即保证观测的细致度, 又可以减少数据量. 表 2 中除了平均发射功率正好相反外, 其他各项最小值对应近端入射角 10°, 各项最

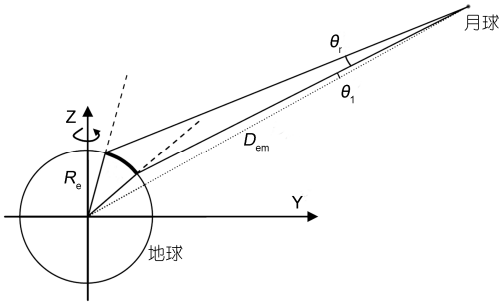


图 2　距离向波束展宽与地面测绘带幅宽

表 2　GCOLB-SAR 的典型参数

参数(单位)	数值范围
波长(cm)	24
天线高度(m)	57
入射角范围(°)	10~66
测绘带幅宽(km)	1680~2802
信号带宽(MHz)	100
天线长度(m)	198~837
天线增益(dB)	64~70
平均发射功率(kW)	>121
方位分辨率(m)	1.6~6.9
距离分辨率(m)	1.6~8.6

大值对应远端入射角 66°. 由于曲率因子的存在, 入射角的增加将使测绘带幅宽迅速增加, 从而使最小天线面积限制更加严厉. 为了达到 66°的入射角范围, 则应选择表中各项最大值.

多波段多极化观测也是 SAR 观测全球变化的重要需求. *C* 和 *X* 波段的系统参数的要求比 *L* 波段要宽裕, 最小天线面积和发射功率要小于 *L* 波段, 但测绘带幅宽和干涉极限基线也要小于 *L* 波段. 此外, 从全球变化应用的角度出发, 笔者认为 *L* 波段具有独特的优势: (1) *L* 波段受大气水分的影响最小, 从而能保证重轨干涉和变化检测的精度; (2) *L* 波段具有较好的穿透性, 对于植被遥感研究和土壤水分反演意义重大. 我们从整体观测和干涉基线要求的角度考虑, 将 *L* 波段的系统参数作为一个实例和后文模拟分析的基础.

4　GCOLB-SAR 与星载 SAR 比较以及可能存在的困难

GCOLB-SAR 的距离测绘带幅宽大大高于星载 SAR 系统, 因此可以满足全球变化大尺度整体观测的需求, 图 3 中给出了两者的比较. 2000 km 的测绘带幅宽对应的地心张角约为 18°, 因此实际上只需规划出 9~10 d 的开机时间就可以完成一次地球的完全覆盖. 但是, GCOLB-SAR 每个月只有一天能分别观测到南极和北极区域, 使得其一个月只能完成一次全球覆盖. 所以在制定全球变化观测计划时, 可以用 9~10 d 时间完成常规的全球覆盖, 剩下的时间可以进行特殊观测, 比如增加感兴趣区域的观测频率, 进行多角度观测研究. 此外, 月基 SAR 随纬度形成条带, 与星载 SAR 随经度形成的条带相互补充, 为全球变化研究提供更全面的数据.

GCOLB-SAR 扫描模式的观测能力更加出色, 单边观测可在一天内覆盖整个地球的 24%~47%. 如果通过调整天线指向, 左右向轮流观测, 则能在两天内覆盖地表 70%以上的区域. 一个月仅需安排 4 d 开机即可完整覆盖全球一次.

表 3 在其他几个方面对 LEOSAR、GEOSAR 和 GCOLB-SAR 进行了比较. LEOSAR 和 GCOLB-SAR 均有能力完成全球覆盖, 前者的纬度覆盖均匀性较好, 极地观测频率高, 后者的经度覆盖均匀性较好, 中纬度观测频率高. GEOSAR 至少需要 3 颗星才能完成全球覆盖, 而且与 GCOLB-SAR 一样, 完成覆盖需要制定精确的观测计划, 通过变换天线指向完成. GEOSAR 最大的优势在于其同模式观测间隔只要 1 d, 而 GCOLB-SAR 的同模式观测间隔是变化的, 如当月球星下点接近回归线时, 位置重返可能只间隔一天, 也可能间隔近一个月(可参考图 4). GCOLB-SAR 的平台优势较为明显, 系统稳定性高, 可操作性好, 大型天线的安装和控制都较为方便, 可放置多个天线形成稳定基线, 形成的连续观测时间序列长, 但造

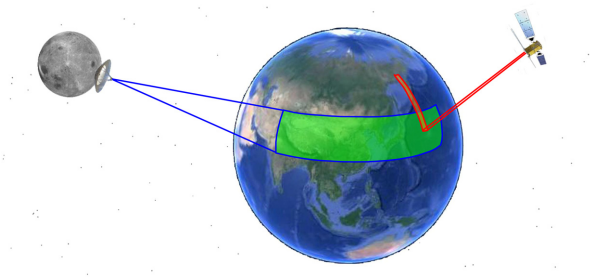


图 3　GCOLB-SAR 与普通星载 SAR 成像条带比较(背景来自谷歌地球)

表 3　LEOSAR, GEOSAR 和 GCOLB-SAR 比较

	LEOSAR	GEOSAR	GCOLB-SAR
轨道可控性	高度倾角可控	倾角可控	不可控
全球覆盖	可以	至少 3 颗卫星	可以
均匀覆盖	纬度均匀性好	不均匀	经度均匀性好
同模式观测间隔	数十天	1 天	1 天~1 个月
空间分辨率	米至十米级	米至十米级	米至十米级
连续观测时间序列长度	短	短	长
大型天线安装和姿态控制	难	难	容易
能量供应	太阳能	太阳能	太阳能和核能
固定多基线天线组	不可	不可	可以
平台稳定性	一般	一般	好
造价	便宜	中等	昂贵

价较昂贵; 卫星平台稳定性较差, 大型天线的姿态控制较困难, 无法放置固定多基线天线组, 形成的连续观测时间序列短, 但成本相对较低.

GCOLB-SAR 虽然具有一些优势, 但目前还存在一些关键问题需要分析, 如供能、低温影响、数据传输等. 月球上可供利用的能源主要有太阳能和核聚变燃料(欧阳自远, 2005), 可以混合利用太阳能电池板和不久的将来就可以实用的核聚变反应堆为月球基地和月基 SAR 提供能量. 月球表面受到太阳照射与没有受到太阳照射的位置的温差很大, 极限温度可分别达到 150 和–180℃. 尤其是在昼夜交替之际, 温度变化十分剧烈, 从而引起天线固有频率和结构动力学变化. 解决的方法是给天线增加控温装置, 如涂层、电加热器和红外灯等. 在绝大多数 SAR 系统设计中, 可实现的下传数据率是主要限制之一. 假设月基 SAR 的量化比特数为 2, 斜距测绘带宽为 1500 km, 方位向和距离向过采样率均为 1.2, 考虑 I/Q 双通道, 每秒的平均实时下传数据率约为 1.6 Gbit (Curland 等, 1991). 月基 SAR 依靠月球载人基地建设, 这使其具有实时处理的能力, 数传限制没有星载 SAR 急迫. 月球基地能量供给较为充足, 因此也可以通过增加传输通道来解决数传的限制. 月球上没有大气, 重力较小, 可以使用重量较轻的薄膜天线. GCOLB-SAR 的造价较高, 建设费用主要来自天线系统的运输. 所以低成本运输技术的开发也是实现 GCOLB-SAR 过程中重要的一环. 到都目前是概念性探索研究, 相信随着科学技术的进步, 将来该技术实现时的经济成本会可接受. 此外 GCOLB-SAR 还面临许多关键技术问题, 需要研发具有针对性的解决方案和数据处理方法, 如适合长孔径的曲线成像算法、Gbit 量级的数据传输手段、精确的几何定标和辐射定标的方法等, 月球表层环境对设备的影响、选址等也是实现 GCOLB-SAR 不得不解决的问题.

5　GCOLB-SAR 的观测目标

GCOLB-SAR 具有高分宽幅的特点, 能直接获取大范围地表参数随时间变化的规律, 对于揭示全球变化现象发生、发展过程及它们之间的相互作用有着重要意义, 笔者对几个典型的全球变化科学现象的 GCOLB-SAR 观测能力进行了分析.

植被是全球碳库的重要组成部分, 其生长情况与温度、降水和 CO_2 浓度密切相关, 是全球物质循环的重要研究内容. 雷达系统通过测量植被的后向散射系数来监测植被生长状况, 也可以通过极化干涉测量获取植被的形态结构特征. 世界上的植被基本分布在南北纬 66°之间, 利用 GCOLB-SAR 均可达到 50%以上的天数覆盖. 通过优化观测计划, 标准模式下 GCOLB-SAR 每个月可以完成 4 次全球植被覆盖, 最少可用 5 d 完成一次覆盖, 而现在的低地球轨道 SAR 系统完成一次全球植被覆盖需要一个回归周期, 如 RADARSAT 是 24 d. GCOLB-SAR 在观测沿纬度向分布的植被带时更加具有优势. 无论是从亚马逊、刚果到印度尼西亚的全球热带雨林带, 还是在欧亚和北美大陆北部延展的大面积亚寒带针叶林, 该系统可以 1~2 d(但不是每一天)完全覆盖.

农业生态系统与人类活动关系密切, 是全球碳库中最为活跃的部分之一, 由于农作物种植面积大, 生长迅速, 生物量变化较快, 它能在较短时间尺度上调节全球碳库. 利用星载雷达系统进行监测, 相邻两个轨道的图像可能差几天甚至十几天, 因此利用不同轨道获得的雷达数据反演出的农作物生长参数难

以进行统计分析. GCOLB-SAR 可以同时获取大范围地表信息, 用于观测完全集中在中低纬度的全球农业区可达到 60%以上的时间覆盖度, 能够得到小于半个月时间间隔的大区域覆盖的雷达时间序列图像.

土壤水分是揭示全球水循环机理的重要因子. 它在时间和空间上变化较为剧烈, 对其进行连续、细致观测对于理解陆面过程非常重要(Madsen 等, 2001). 微波遥感反演地表土壤水分的方法主要有基于雷达或散射计的主动微波遥感方法. 主动微波空间分辨率较高, 但重复观测率低; 被动微波具有较高的时间分辨率, 但是空间分辨率较低(施建成等, 2012). GCOLB-SAR 利用大的观测范围得到多次观测, 同时又具有良好的空间分辨率, 但需要注意消除不同观测角度所带来的影响.

冰川的进退变化是全球和区域气候变化的敏感指示器. 与星载系统相比, 月基 SAR 由于观测时间较短, 观测入射角较大, 因此不能很好地观测两极. 对于中低纬度的山岳冰川, GCOLB-SAR 在覆盖的空间尺度和观测的频度上都要好于现有系统. 青藏高原的冰川流速在夏季时变化较快, 利用月基 InSAR 可以在数小时内获取整个青藏高原冰川的流速信息, 对于研究青藏高原整体的物质能量平衡有重要意义.

另外, GCOLB-SAR 还能跟踪水灾, 特别是大范围水灾的发生发展过程, 而且其视线大致与极地海冰线走势垂直, 形成二面角效应, 使海冰线在图像上表现更为清晰, 从而有能力整体揭示全球海冰线的动态变化, 对大型地震、火山的形变监测也能消除干涉条纹的不连续性. 特别是把地球的陆地、海洋、大气作为一个整体进行研究, 月基 SAR 观测具有极大优势.

6　大面积区域同时观测示例

笔者用月球实际轨道数据模拟了月基 SAR 观测青藏高原和亚马逊平原的时间窗口和波束位置, 并通过掩模计算每次观测中对象的覆盖度, 其中轨道数据采用 JPL 的星历 DE405, DE405 提供了太阳、地球、月球的位置数据, 可以利用切比雪夫插值提高数据密度, 得到每分钟三者的位置数据(张道卫等, 2011). 因为海拔较高, 青藏高原上的冰川、冻土和湖泊对大气温度变化相当敏感, 是研究全球气候变化和水循环的重要实验区. 亚马逊平原是世界上最大的雨林区, 也是研究全球气候变化和碳循环的焦点区域.

在这 30 天中, 对青藏高原和亚马逊平原分别完成 29 次观测. 从图 4(a)可以看到, 第 7, 8, 9 天三天只完成两次观测. 同样, 从图 4(b)中可以看到, 第 23, 24, 25, 26 天四天只完成观测三次. 这是因为月球公转方向与地球自转方向一致, 所以月基 SAR 的观测重复观测周期略大于一个太阳日, 约为 24 h 50 min, 即一个太阴日. 这造成月基 SAR 相隔一个轨道周期的两次观测几何存在微小的差异. 如图 4(a)的第 1 天和第 28 或第 29 天观测时间窗口和月球星下点纬度并不完全一致, 而是有微小的改变. 在某些高精度的应用中, 这种观测几何的差异需要进行校正. 除此之外, 图 4(a)显示月球星下点在北半球的时长约为 14.5 d, 比在南半球的时间要多两天左右. 由开普勒第二定律可知, 地心月心连线扫过远地点时的速度较慢, 扫过近地点时的速度较快. 所以, 造成星下点偏向于北半球的可能原因是月球远地点刚好处于赤道面以上. 星下点的“偏向”会造成波束覆盖和可见范围的偏向,

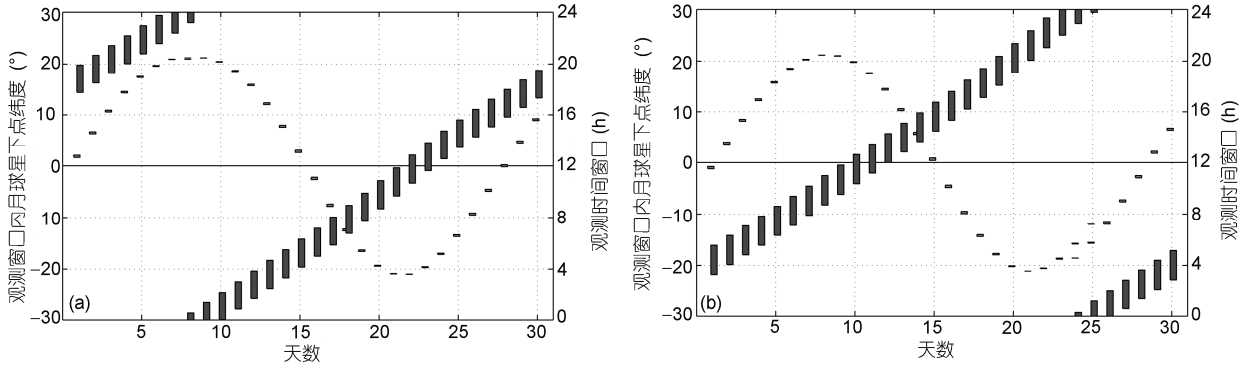


图 4　30 天内 GCOLB-SAR 观测青藏高原(a)和亚马逊平原(b)的时间窗口和窗口内月球星下点纬度变化

竖直的矩形方框表示时间窗口; 波浪形点线表示点纬度

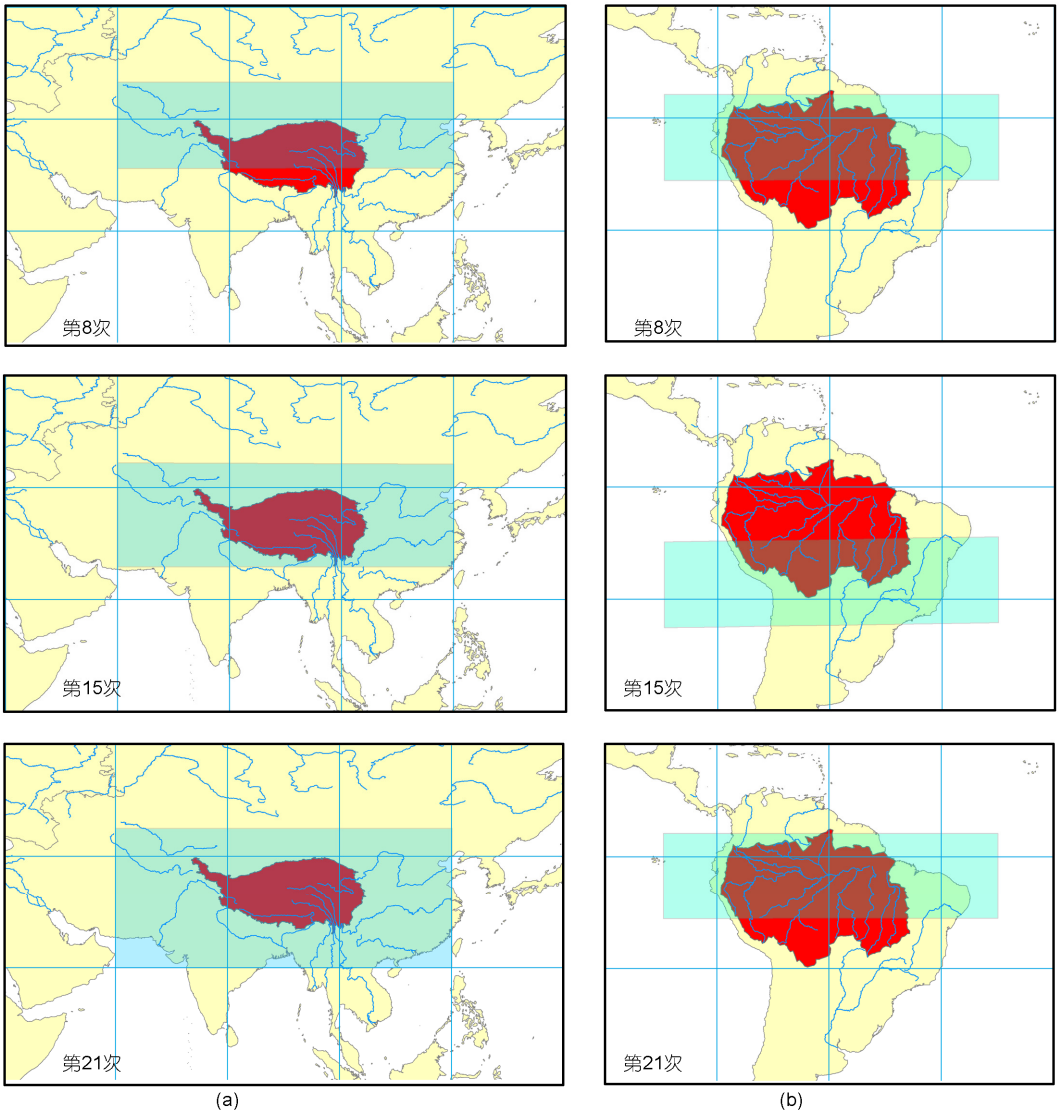


图 5　30 天内 GCOLB-SAR 第 8, 15, 21 次观测青藏高原(a)和亚马逊平原(b)的条带(背景来自 ESRI)

即远地点一侧, 观测时间相对较长, 覆盖天数增加, 而近地点一侧的观测时间相对较短, 覆盖天数减少.

图 5 给出了 30 天内 GCOLB-SAR 第 8, 15, 21 次观测青藏高原(a)和亚马逊平原(b)的条带, 分别对应三个月球星下点位置: 最北端、赤道附近和最南端. 第 8 次观测时, 月球星下点位于北纬 21°左右, 条带宽度为 1680 km. 青藏高原南部不能覆盖, 覆盖度约为 70%. 随着月球星下点南移, 覆盖度和条带宽度缓慢增加, 观测入射角也不断增大. 第 15 次和第 21 次观测时, 覆盖度可以达到 100%, 测绘带幅宽分别增大到 2000 和 2800 km. 亚马逊平原完全处于星下点影响区, 因此无法完全覆盖. 第 8 次和第 15 次观测时为左侧视, 第 21 次观测时为右侧视, 测绘带幅宽为 1680~1800 km. 三次观测的覆盖度分别为 70%, 40% 和 70%, 对应可选择的最小入射角分别为 15°, 10°和 10°. 调整最小入射角可以控制测绘带的位置, 如第 8 天选择 15°, 第 9 天选择 30°, 这样只用相邻的两天就能达到整体覆盖.

7　结论与展望

本文提出用月基 SAR 系统进行全球变化观测的

新概念, 提出 GCOLB-SAR 的设想. GCOLB-SAR 在全球变化监测具有良好的空间覆盖性能和分辨能力, 尤其是在扫描模式下幅宽可以达到 6500 km, 是星载 SAR 的 10 余倍. GCOLB-SAR 观测幅宽使其单独就可以提供多种覆盖整个南半球或北半球的环境参数. 另外, 不同纬度区域的可观测天数也不同, 中低纬度地区较高, 而高纬度地区较低. 其提供大范围时间序列数据的能力也大大超过其他 SAR 系统, 适合为全球变化研究服务. 月球是人类探索太空的第一站, 一旦月球基地建成, 架设月基 SAR 就有了坚固的基础, GCOLB-SAR 概念实现之时, 将对人类研究全球环境变化和地球系统科学提供崭新的技术手段和能力.

致谢 在项目研究及成文过程中, 朱岚巍、沈国状、严珍珍、鹿琳琳等做出了贡献, 审稿人提出宝贵意见, 在此一并致谢.

参考文献

郭华东. 2000. 雷达对地观测理论与应用. 北京: 科学出版社

欧阳自远, 主编. 2005. 月球科学概论. 北京: 中国宇航出版社

施建成, 杜阳, 杜今阳, 等. 2012. 微波遥感地表参数反演进展. 中国科学: 地球科学, 42: 814–842

张道卫, 郭华东, 刘广, 等. 2011. 基于 OpenGL 日地月系统仿真技术研究综述. 第二十四届全国空间探测学术交流会论文摘要集

Bruno D, Hobbs S, Ottavianelli G. 2006. Geosynchronous synthetic aperture radar: Concept design, properties and possible applications. Acta Astronaut, 59: 149–156

Bruno D, Hobbs S. 2010. Radar imaging from geosynchronous orbit: Temporal decorrelation aspects. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 48: 2924–2929

Carruthers G, Page T. 1972. Apollo 16 far-ultraviolet camera/spectrograph: Earth observations. Science, 177: 788–791

Curland J, Mcdonough R. 1991. Synthetic Aperture Radar Systems and Signal Processing. New York: John Wiley & Sons Inc

Fornaro G, Franceschetti G, Lombardini F, et al. 2010. Potentials and limitations of Moon-borne SAR imaging. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 48: 3009–3019

Henderson F, Lewis A. 1998. Manual of Remote Sensing: Principles and Applications of Imaging Radar. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons Inc

Kiyo T, Jean P. 1983. Synthetic aperture radar imaging from an inclined geosynchronous orbit. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, GE-21: 324–329

Madsen S, Edelstein W, DiDomenico L, et al. 2001. A geosynchronous synthetic aperture radar: For tectonic mapping, disaster management and measurements of vegetation and soil moisture. IGARSS'01. 447–449

Moccia A, Renga A. 2010. Synthetic aperture radar for Earth observation from a lunar base: Performance and potential applications. IEEE Trans Aero Elec Sys, 46: 1034–1051

Palle E, Goode P R. 2009. The lunar terrestrial observatory: Observing the Earth using photometers on the Moon's surface. Adv Space Res, 43: 1083–1089

Rignot E, Mouginot J, Scheuchl B. 2011. Ice flow of the Antarctic ice sheet. Science, 333: 1427–1430

Rosenqvist A, Shimada M, Chapman B, et al. 2000. The global rain forest mapping project—A review. Int J Remote Sens, 21: 1375–1387

Rosenqvist A, Shimada M, Ito N, et al. 2007. ALOS PALSAR: A pathfinder mission for global-scale monitoring of the environment. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 45: 3307–3316

Steffen W, Sanderson A, Tyson P, et al. 2004. Global Change and The Earth System: A Planet Under Pressure. 5th ed. New York: Springer

论 文

附录 计算坐标系

月基 SAR 对地观测涉及到多个坐标系统, 如定义天线位置的月面经纬坐标系, 定义观测几何模型的地心惯性坐标系、确定目标位置的地表经纬网等. 在前述简化模型的基础上, 可以建立地心右手惯性坐标系(X, Y, Z), Z 轴指向地球北极, X 轴指向月球在地球赤道面上的投影. 设(X_m, Y_m, Z_m)为月球的坐标, (α_m, δ_m)为月球的赤经和赤纬; (X_g, Y_g, Z_g)为地面目标的坐标, (α_g, δ_g)为目标的赤经和赤纬, D_{em} 为地月距离. 可以推出: X_m=0, Y_m=D_{em}cosδ_m, Z_m=D_{em}sinδ_m. 将最近距离时刻设为 t=0 时刻, 此时 X_g=X_m=0, 则 t 时刻目标点位矢与零时刻位矢的夹角为

$$\alpha_g(t)=\omega_e t.$$

这样目标坐标可表示为 $(R_e\cos\delta_g\sin\alpha_g, R_e\cos\delta_g\cos\alpha_g, R_e\sin\delta_g)$, 天线与目标的距离为

$$R(t)=\sqrt{(X_m-R_e\cos\delta_g\sin\alpha_g(t))^2+(Y_m-R_e\cos\delta_g\cos\alpha_g(t))^2+(Z_m-R_e\sin\delta_g)^2}.$$

做变量代换并化简后得到

$$R(t)=\sqrt{M\cos\alpha_g(t)+N},$$

其中 $M=-2R_eY_m\cos\delta_g$, $N=D_{em}^2+R_e^2-2R_eZ_m\sin\delta_g$.

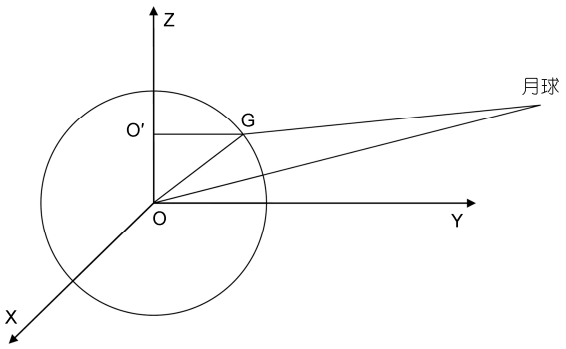
目标在波束中任一时刻的多普勒频率可以估计为

$$f_D(t)=\frac{-2R'(t)}{\lambda}=-\frac{2}{\lambda}\cdot\frac{-M\sin\alpha_g(t)}{2\sqrt{M\cos\alpha_g(t)+N}}\cdot\omega_e.$$

多普勒带宽估计为

$$B_D=f_{d_max}-f_{D_min}=-2f_D(T/2),$$

其中 T 为积分时间, 为天线孔径的函数.



附图 1 计算坐标系